·论著·

减重代谢手术后运动训练对2型糖尿病合并肥胖患者心肺功能的影响：一项随机对照试验

金彦[1，2]，杨洋[1，2]，王璐璐[3]，郑清婉[2]，李新艳[4*]，张宁[5*]

1.210008 江苏省南京市，南京中医药大学鼓楼临床医学院
2.210023 江苏省南京市，南京中医药大学针灸推拿学院·养生康复学院康复医学系
3.210008 江苏省南京市，南京泰康仙林鼓楼医院心内科
4.210029 江苏省南京市，江苏省卫生健康发展研究中心
5.210008 江苏省南京市，南京鼓楼医院超声医学科
*通信作者：李新艳，高级工程师；E-mail：xinyanli1985@163.com
张宁，主任医师；E-mail：neneenen@163.com

【摘要】 **背景** 2型糖尿病（T2DM）合并肥胖是一种日益严重的全球公共卫生问题，患者常伴有胰岛素抵抗、代谢异常及慢性炎症及心肺功能受损。尽管减重代谢手术可在降低BMI的同时缓解糖尿病、高血压等症状，但术后心肺功能降低影响患者的运动能力及生活质量。运动干预被广泛认为能改善心肺功能，但术后有氧与抗阻训练对患者心肺功能的影响尚不明确。**目的** 探索减重代谢手术后运动训练对T2DM合并肥胖症患者心肺功能的影响。**方法** 选取2022年南京鼓楼医院内分泌科接诊的60例T2DM合并肥胖待行减重代谢手患者为研究对象，使用随机数字表法分成运动组（30名）和对照组（30名）。术后4周为恢复期，期间鼓励适当运动。术后4周后运动组和对照组均行心肺运动试验评估心肺功能以定制运动处方。对照组每日运动满足日常体力活动，运动组在对照组的基础上加入80%无氧阈值指导的中等强度有氧训练和抗阻训练项目，两组均训练12周。训练12周后检测两组的形态学指标、心肺功能指标及血生化指标。**结果** 对照组有1例受试者因个人原因无法继续配合研究。运动组共有4例受试者未能完成研究，其中3例因未达到实际要求的运动量、1例因个人原因退出研究，最终完成试验者55例（运动组26例，对照组29例）。混合测量方差分析显示，组别与时间对腹围、胆固醇存在交互作用（$P<0.05$）；组别分别对腹围、餐后2h血糖、胆固醇主效应显著（$P<0.05$）；组别与时间对峰值摄氧量、千克峰值摄氧量、峰值代谢当量、峰值功率、无氧阈下功率、千克峰值功率、峰值每分通气量、无氧阈摄氧量、无氧阈摄氧量占峰值摄氧量百分比、峰值氧脉搏、静息收缩压存在交互作用（$P<0.05$）。术后4周，运动组峰值呼吸商、峰值功率、无氧阈下功率、峰值每分通气量、二氧化碳通气当量斜率、无氧阈摄氧量与术前相比，差异有统计学意义（$P<0.05$）。术后4周，对照组峰值摄氧量、峰值代谢当量、无氧阈下功率、峰值每分通气量、二氧化碳通气当量斜率、无氧阈摄氧量与术前相比，差异有统计学意义（$P<0.05$）。训练12周后，运动组体腹围、空腹血糖、餐后2h血糖、糖化血红蛋白、胆固醇、峰值摄氧量、无氧阈下功率、千克峰值功率、峰值每分通气量、无氧阈摄氧量、千克无氧阈摄氧量、无氧阈摄氧量占峰值摄氧量百分比与对照组比较，差异有统计学意义（$P<0.05$）。**结论** 减重术后4周，T2DM合并肥胖患者心肺功能降低；术后12周的运动训练能够减少患者的腹围，改善血糖血脂水平，改善心肺功能。

【关键词】 运动训练；心肺运动试验；减重代谢手术；糖尿病；肥胖症；南京市；混合测量方差分析
【中图分类号】 R 165 【文献标识码】 A DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2024.0529

Effects of Exercise Training after Bariatric Surgery on Cardiopulmonary Function in Patients with Type 2 Diabetes Mellitus and Obesity：a Randomized Controlled Trial

JIN Yan[1，2]，*YANG Yang*[1，2]，*WANG Lulu*[3]，*ZHENG Qingwan*[2]，*LI Xinyan*[4*]，*ZHANG Ning*[5*]

基金项目：江苏省卫生健康发展研究中心开放课题（JSHD2021001）；中国康复医学会科技发展项目（KFKT-2024-009）；江苏省基础研究专项资金项目（BK20241907）；国家自然科学基金资助项目（82302847）

引用本文：金彦，杨洋，王璐璐，等.减重代谢手术后运动训练对2型糖尿病合并肥胖患者心肺功能的影响：一项随机对照试验［J］.中国全科医学，2024. DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2024.0529.［Epub ahead of print］.［www.chinagp.net］

JIN Y，YANG Y，WANG L L，et al. Effects of exercise training after bariatric surgery on cardiopulmonary function in patients with type 2 diabetes mellitus and obesity：a randomized controlled trial［J］. Chinese General Practice，2024.［Epub ahead of print］.



1.Clinical College of Nanjing University of Chinese Medicine，Nanjing 210008，China
2.Department of Rehabilitation，School of Acupuncture-Moxibustion and Tuina & School of Health Preservation and Rehabilitation，Nanjing University of Chinese Medicine，Nanjing 210023，China
3.Department of Cardiology，Taikang Xianlin Drum Tower Hospital，Nanjing 210008，China
4. Jiangsu Health Development Research Center，Nanjing 210029，China
5.Department of Ultrasound，Nanjing Drum Tower Hospital，Nanjing 210008，China
*Corresponding author：LI Xinyan，Senior engineer；E-mail：xinyanli1985@163.com
ZHANG Ning，Chief physician；E-mail：neneenen@163.com

【Abstract】 **Background** Type 2 diabetes mellitus（T2DM）combined with obesity is an increasingly concerned severe global public health issue. Patients typically experience insulin resistance，metabolic abnormalities，chronic inflammation，and impaired cardiopulmonary function. Bariatric surgery can reduce the body mass index（BMI），and alleviate diabetic and hypertensive symptoms. However，postoperative cardiopulmonary function decline negatively influences the motor function and quality of life. Postoperative intervention of rehabilitation is an established way to improve the cardiopulmonary function，although the effect of postoperative aerobic and resistance training on the cardiopulmonary function of T2DM patients combined with obesity remains unclear. **Objective** To explore the effects of exercise training after bariatric surgery on cardiopulmonary function in T2DM patients combined with obesity. **Methods** Sixty T2DM patients combined with obesity admitted at the Department of Endocrinology，Nanjing Drum Tower Hospital in 2022，who were treated with an elective bariatric surgery were selected as study subjects. They were randomly divided into the exercise group（*n*=30）and control group（*n*=30）using a random number table method. A recovery period was defined as the first 4 weeks postoperatively，during which patients were encouraged to engage in physical activities at a moderate intensity. After 4 weeks，cardiopulmonary exercise tests were conducted in both the exercise group and the control group to assess cardiopulmonary function and tailor exercise prescriptions. The control group was instructed to perform daily activities that met general physical activity recommendations，while the exercise group was additionally given to moderate-intensity aerobic and resistance training at 80% of the anaerobic threshold. Both groups were intervened for 12 weeks. After 12 weeks of training，the morphological parameters，cardiopulmonary function indicators，and blood biochemical markers of the two groups were assessed. **Results** One patient in the control group was unable to continue with the study due to personal reasons. In the exercise group，4 subjects were unable to complete the study，with 3 failing to meet the required exercise volume and 1 withdrew for personal reasons. Ultimately，55 patients completed the trial，including 26 in the exercise group and 29 in the control group. The mixed ANOVA showed an interaction between group and time for abdominal circumference and cholesterol（$P<0.05$）. The main effects of the group were significant for abdominal circumference，postprandial 2-hour blood glucose，and cholesterol（$P<0.05$）. There was a significant interactions between group and time in the peak oxygen uptake，peak oxygen uptake in kg，peak METs（among of energy used during any activity），peak work rate，anaerobic threshold（AT）power（power@AT），peak work rate in kg，peak ventilatory equivalent（VE），anaerobic threshold oxygen uptake（VO_2），VO_2@AT/peakVO_2，Peak O_2 pulse，and resting systolic blood pressure（SBP）（$P<0.05$）. In the exercise group，there were significant differences in the peak respiratory exchange ratio（RER），peak watts，Power@AT，peak VE，VE/VCO_2 slope，and anaerobic threshold oxygen uptake before and 4 weeks after surgery（$P<0.05$）. In the control group，there were significant differences in peak oxygen uptake，peak METs，power@AT，peak VE，VE/VCO_2 slope，and anaerobic threshold oxygen uptake before and 4 weeks after surgery（$P<0.05$）. After 12 weeks of training，there were significant differences in abdominal circumference，fasting blood glucose，postprandial 2-hour blood glucose，hemoglobin A1C（HbA_{1c}），cholesterol，peak oxygen uptake，power@AT，peak work rate，peak VE，anaerobic threshold oxygen uptake，anaerobic threshold oxygen uptake in kg and VO_2@AT/PeakVO_2 between groups（$P<0.05$）. **Conclusion** Cardiopulmonary function decreases in T2DM patients combined with obesity at four weeks after bariatric surgery. Twelve weeks of exercise training post-surgery can reduce waist circumference，improve blood glucose and lipid levels，and enhance cardiopulmonary function.

【Key words】 Exercise training；Cardiopulmonary exercise test；Bariatric surgery；Diabetes mellitus；Obesity；Nanjing；Mixed measures ANOVA

对于 BMI>30 kg/m^2 的肥胖患者，目前最有效的治疗方法为减重代谢手术。有研究表明，尽管减重代谢手术在减重方面效果显著，但仍有一部分患者未能达到理想的减重效果。同时，术后心肺功能降低影响了患者的运动能力及生活质量[1]。因此，运动作为减重代谢手术后管理的关键组成部分，对于预防术后体质量反弹[2]、

改善肌肉质量[3]、提高心肺功能[4]起着至关重要的作用。尽管运动干预被广泛认为能改善这些状况，然而对于心肺功能普遍下降[5-6]的2型糖尿病（type 2 diabetes mellitus，T2DM）合并肥胖患者，术后有氧结合抗阻训练对患者心肺功能的影响尚不明确。因此，本研究以T2DM合并肥胖待行减重代谢手术患者为对象，评估术后运动训练对心肺功能的影响，为该类患者心肺功能改善提供康复依据。

1 对象与方法

1.1 研究对象

选取2022年南京鼓楼医院内分泌科接诊的T2DM合并肥胖待行减重代谢手术患者为研究对象，经医师评估纳入、排除标准后共招募受试者60例。

纳入研究的患者均全面知悉本研究所有步骤及相关潜在风险，研究开始前签署知情同意书。本研究经过南京鼓楼医院伦理委员会审批（批准号：2022-412-02）。

1.1.1 纳入标准：符合《中国2型糖尿病防治指南（2020）》中T2DM诊断标准[7]；年龄18~60岁；BMI>30 kg/m^2；拟行减重代谢手术；签署知情同意书。满足以上所有条件者纳入本研究。

1.1.2 排除标准：认知障碍及不能定期就诊；合并严重肝、肾、造血系统等原发性疾病；重度心、肺功能不全；合并感染、恶性肿瘤；合并周围血管病、脑血管病；妊娠、哺乳期妇女；精神异常；有心肺运动试验（cardiopulmonary exercise testing，CPET）禁忌证。凡符合1项予以排除。

1.1.3 终止指标：研究期间，患者若自主选择退出研究或者未能按照规定要求进行配合，视为脱落病例；在研究过程中，患者运动依从性<85%或>120%（运动依从性=应有运动量/实际运动量×100%）；在治疗进程中，一旦受试者出现任何严重不良事件，或是由其他疾病引发的严重影响健康的并发症，将立即停止研究，以保障受试者的安全权益。

1.2 研究方法

60例患者使用随机数字表法分成运动组（30名）和对照组（30名）。两组患者在术前均进行CPET评估心肺功能，并进行形态学测量。术后4周内为恢复期，患者以代餐行流食饮食，因此仅鼓励适当运动，不进行运动干预。

术后4周运动组和对照组均行CPET评估心肺功能以定制运动处方。对照组遵从常规糖尿病护理建议，保持原生活方式，无特定运动计划。运动组完成根据80%无氧阈值（anaerobic threshold，AT）制定的中等强度有氧训练和抗阻训练项目。两组均干预12周。

1.3 运动方案

1.3.1 运动组：受试者进行12周的有氧运动和抗阻运动（3次/周，1 h/次），每次运动在专业人员的监督和指导下完成。

有氧运动：40 min/次。包括（1）热身：10 min，按照从头到脚的顺序依次活动身体的各个关节，拉伸韧带；（2）有氧运动训练：25 min，使用功率自行车进行锻炼；（3）缓和：5 min，引导呼吸、放松身体。运动强度的设定参照术前通过CPET得出的AT，采用V-Slope法进行测定，以80%的AT结合患者在运动过程中的主观疲劳感觉（使用Borg量表进行评分），为患者定制个性化的运动处方。

抗阻运动：受试者进行10次最大重复值（repetition maximum，RM）强度测试确定单次最大重复值（1 RM）。借助训练器械针对上肢肱二头肌和下肢股四头肌展开强化训练，强度为60%1 RM，每次训练3组，组间休息1 min，每次每个环节重复15次。如果受试者能轻松完成10次重复规定运动，可适当增加负重；如完成有困难，可减少重复次数。共运动20 min。

1.3.2 对照组：对照组遵从常规糖尿病护理，保持原生活方式，无特定运动计划。

1.4 CPET

选用Cosmed Quark PFT（Cosmed，Rome，Italy）测试CPET。根据美国Harbor-UCLA中心心肺运动实验室的标准，首先完成静息状态肺功能检查（包括快速肺活量、慢速肺活量、最大分钟通气量、弥散功能测定），然后采用连续递增功率方案（Ramp递增方案）完成症状限制性最大极限CPET。

CPET共分为4个阶段，包括静息3 min，热身3 min（无功率踏车），然后以10 W/min或30 W/min或60 W/min功率递增速率运动直至症状限制性最大极限运动，随之恢复5 min以上。在完成CPET过程中需要连续测定12导联心电图、无创袖带血压、氧饱和度。整个过程中在安全保证及严格质量控制条件下，完成受检者CPET各项参数的记录及准确计算。

1.5 测试指标

1.5.1 形态学指标：受试者身高、体质量，计算BMI；测量腹围。

1.5.2 血生化指标：空腹血糖、餐后2 h血糖、糖化血红蛋白、三酰甘油、胆固醇、H-胆固醇及L-胆固醇。

1.5.3 心肺功能指标：通过CPET仪器收集患者的峰值呼吸商、峰值摄氧量、千克峰值摄氧量、峰值代谢当量、峰值功率、无氧阈下功率、千克峰值功率、峰值每分通气量、二氧化碳通气当量斜率、无氧阈摄氧量、千克无氧阈摄氧量、无氧阈摄氧量占峰值摄氧量百分比、峰值氧脉搏、静息心率、峰值心率、无氧阈心率、静息收缩压、静息舒张压、峰值运动收缩压、峰值运动舒张压。

测试时间点为手术前、术后 4 周和训练 12 周后。

1.6 统计学方法

由不知分组情况的第三者进行疗效评价；资料总结阶段采用盲法统计分析，实行运动监督者、疗效评价者、统计者三分离。

符合正态分布的计量资料以（$\bar{x} \pm s$）表示，偏态分布的计量资料采用 M（Q_1，Q_3）表示，计数资料以相对数表示。基本信息组间计量资料比较使用配对 t 检验，计数资料采用 χ^2 检验。心肺功能及血生化指标采用混合测量方差分析，采用 Bonferroni 方法对检验水准 α=0.05 进行校正后进行两两比较。使用 SPSS 27.0 统计软件包进行统计分析，以 P<0.05 为差异有统计学意义。为评估医院环境下干预的实际效果，数据采用治疗意向分析和末次结转法进行处理。

2 结果

对照组有 1 例受试者因个人原因无法继续配合研究。运动组共有 4 例受试者未能完成研究，其中 3 例因未达到实际要求的运动量、1 例因个人原因退出研究，最终完成试验人数为 55 例（运动组 26 例，对照组 29 例）。

2.1 两组一般资料比较

手术前两组患者年龄、性别、身高和体质量比较，差异无统计学意义（P>0.05），见表 1。

表 1 两组患者一般资料比较

Table 1 Comparison of general conditions between the two groups

组别	例数	年龄（岁）	性别（男/女）	身高（cm）	体质量（kg）
对照组	30	29.2 ± 8.3	8/22	167.2 ± 5.5	93.6 ± 12.4
运动组	30	30.9 ± 8.1	7/23	165.5 ± 7.9	92.6 ± 12.5
t（χ^2）值		0.791	0.089[a]	−0.937	−0.294
P 值		0.432	0.766	0.353	0.770

注：[a] 为 χ^2 值。

2.2 两组患者 BMI、腹围、血糖和血脂指标比较

组别与时间对腹围、胆固醇存在交互作用（$P_{交互}$<0.05）；组别分别对腹围、餐后 2 h 血糖、胆固醇主效应显著（$P_{组间}$<0.05）；时间对除 L- 胆固醇外的其他指标主效应显著（$P_{时间}$<0.05）。

术前运动组和对照组所有指标差异无统计学意义（P>0.05）。术后 4 周，运动组空腹血糖、H- 胆固醇低于对照组，运动组餐后 2 h 血糖高于对照组，差异有统计学意义（P<0.05）。训练 12 周后，运动组腹围、空腹血糖、餐后 2 h 血糖、糖化血红蛋白、胆固醇低于对照组，差异有统计学意义（P<0.05）。

组内比较显示，运动组 BMI、腹围在术后均降低，3 个时间点比较，差异均有统计学意义（P<0.05）；运动组糖化血红蛋白训练 12 周后低于术前及术后 4 周，差异有统计学意义（P<0.05）；运动组，H- 胆固醇训练 12 周后高于术前及术后 4 周，差异有统计学意义（P<0.05）；两组空腹血糖、餐后 2 h 血糖术后 4 周低于术前，差异有统计学意义（P<0.05）；两组空腹血糖、餐后 2 h 血糖训练 12 周后低于术前及术后 4 周，差异有统计学意义（P<0.05）；两组三酰甘油、胆固醇、H- 胆固醇、L- 胆固醇在术后 4 周及训练 12 周后与术前比较，差异有统计学意义（P<0.05），见表 2。

2.3 两组患者术前、术后 4 周、训练 12 周后心肺功能比较

组别与时间对峰值摄氧量、千克峰值摄氧量、峰值代谢当量、峰值功率、无氧阈下功率、千克峰值功率、峰值每分通气量、无氧阈摄氧量、无氧阈摄氧量占峰值摄氧量百分比、峰值氧脉搏、静息收缩压存在交互作用（$P_{交互}$<0.05）；组别分别峰值呼吸商、千克峰值摄氧量、峰值代谢当量、峰值每分通气量、千克无氧阈摄氧量、峰值心率主效应显著（$P_{组间}$<0.05）；时间对峰值呼吸商、千克峰值摄氧量、峰值代谢当量、无氧阈下功率、千克峰值功率、峰值每分通气量、二氧化碳通气当量斜率、无氧阈摄氧量、千克无氧阈摄氧量、无氧阈摄氧量占峰值摄氧量百分比、静息心率、峰值心率、无氧阈心率、静息收缩压、峰值运动收缩压主效应显著（$P_{时间}$<0.05）。

术前运动组峰值摄氧量、无氧阈摄氧量占峰值摄氧量百分比、峰值氧脉搏与对照组比较，差异有统计学意义（P<0.05）；术后 4 周，运动组峰值呼吸商、峰值功率、二氧化碳通气当量斜率、峰值氧脉搏、峰值心率、静息收缩压与对照组比较，差异有统计学意义（P<0.05）；训练 12 周后，运动组千克峰值摄氧量、峰值代谢当量、无氧阈下功率、千克峰值功率、峰值每分通气量、无氧阈摄氧量、千克无氧阈摄氧量、无氧阈摄氧量占峰值摄氧量百分比、峰值氧脉搏高于对照组，差异有统计学意义（P<0.05）。

组内比较显示，运动组峰值呼吸商、静息心率、无氧阈心率、静息收缩压、峰值运动收缩压术后 4 周与其他 2 个时间点比较，差异有统计学意义（P<0.05）；运动组千克峰值摄氧量、峰值代谢当量、峰值功率、千克峰值功率、无氧阈摄氧量占峰值摄氧量百分比、峰值氧脉搏训练 12 周后高于术前和术后 4 周，差异有统计学意义（P<0.05）；运动组无氧阈下功率、无氧阈摄氧量，3 个时间点差异有统计学意义（P<0.05）；对照组峰值摄氧量、千克峰值摄氧量，3 个时间点差异有统计学意义（P<0.05）；对照组峰值代谢当量、无氧阈下功率术后 4 周低于其他 2 个时间点，差异有统计学意义（P<0.05）；对照组无氧阈心率术后 4 周高于训练 12 周后，

差异有统计学意义（$P<0.05$）；两组峰值每分通气量、二氧化碳通气当量斜率、峰值心率术后 4 周与其他 2 个时间点相比，差异有统计学意义（$P<0.05$）；两组千克无氧阈摄氧量训练 12 周后与术前相比，差异有统计学意义（$P<0.05$），见表 3。

3 讨论

3.1 运动对身体形态的影响

本研究未对患者进行饮食控制，术后 4 周内为恢复期，患者以代餐行流食饮食，因此仅鼓励患者进行适当运动，不进行运动干预。术后 4 周两组患者的 BMI 和腹围显著下降，可能与流食饮食、肠道吸收功能下降、食欲降低、能量消耗增加等[8]有关。运动干预后，运动组 BMI 和腹围较术后 4 周明显下降（$P<0.05$），而对照组术后与术前比较无明显差异，表明 12 周的运动增加了身体额外的能量消耗。TARDIF 等[9]研究显示，与对照组相比减重术后 12 周的运动能显著降低重度肥胖［平均 BMI（45.9 ± 6.1）kg/m^2）］患者的体质量。且与单纯有氧运动相比，有氧结合渐进式抗阻运动在体质量减轻、功能提高、肌肉质量增加有更大的改善效果[10]。

3.2 运动对血糖及血脂的影响

本研究两组患者的血糖及血脂指标均有所改善。术后 4 周，两组空腹血糖及餐后 2 h 血糖均显著下降，而糖化血红蛋白无显著改善。运动组经 12 周运动，上述血糖指标均显著下降。研究报道，与非糖尿病患者相比，糖尿病患者在减重术后患者报告低血糖症状达 57.9%[11]。本研究运动组血糖下降幅度高于对照组，但所有患者在研究期间未出现低血糖症状。表明运动对维持血糖相对稳定有积极作用。糖化血红蛋白可以反映近 2~3 个月的血糖控制情况，两组糖化血红蛋白在术后 4 周下降，可能与 BMI 降低有关[12]。运动干预后，糖化血红蛋白下降显著，表明运动对调节血糖也有积极作用。减重手术本身可调节 T2DM 患者的血糖水平[13]，与本研究中对照组的血糖控制改善情况一致，而 12 周的运动训练使运动组血糖控制改善明显。与非手术方法相比，减重手术在血糖控制和体质量管理方面显示出优越性，尤其是在 T2DM 合并肥胖的患者中[14]。

本研究两组术后 4 周的三酰甘油和胆固醇均显著降低，运动干预后，运动组上述两个指标进一步降低，而对照组呈现维持或升高，与血糖改变情况类似。说明除减重手术的影响外，运动能进一步改善血脂异常。两组术后 4 周 H- 胆固醇及 L- 胆固醇与术前相比无明显差异。运动干预后，运动组 H- 胆固醇升高、L- 胆固醇降低。有研究显示减重术后 12 周的运动未有效降低重度肥胖患者 L- 胆固醇[9]，本研究术后 4 周两组 L- 胆固醇降低相当，但 12 周运动后运动组 L- 胆固醇降低，对照组 L- 胆固醇升高。提示运动有益于维持术后血脂获益。因此，运动对血脂的调节效果是否受患者基础体质量的影响，有待进一步研究。有研究显示，有氧运动改善血脂的效果与规律运动后体重的降低有关，在对 201 例女性的基因、体质量和血脂进行相关性分析后，体质量的

表 2 两组患者治疗前后 BMI、腹围、血糖、血脂指标比较（$\bar{x} \pm s$）

Table 2 Comparison of BMI，waist circumference，blood glucose，and blood lipids before and after treatment in the two groups

组别	例数	BMI（kg/m^2）			腹围（cm）			空腹血糖（mmol/L）		
		术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后
对照组	30	33.47 ± 3.90	31.93 ± 1.58	30.81 ± 3.68	109.4 ± 3.0	100.8 ± 2.6	96.9 ± 2.4	8.84 ± 3.09	8.04 ± 0.33[a]	6.22 ± 0.19[ab]
运动组	30	33.86 ± 4.43	30.61 ± 6.51[a]	27.01 ± 2.02[ab]	109.0 ± 8.1	101.4 ± 4.9[a]	89.7 ± 2.8[abc]	9.23 ± 2.45	7.67 ± 0.70[ac]	5.61 ± 0.77[abc]
F 值		$F_{交互}$=0.740，$F_{组间}$=0.790，$F_{时间}$=10.961			$F_{交互}$=13.045，$F_{组间}$=10.228，$F_{时间}$=185.126			$F_{交互}$=0.670，$F_{组间}$=0.284，$F_{时间}$=24.587		
P 值		$P_{交互}$=0.479，$P_{组间}$=0.378，$P_{时间}$<0.001			$P_{交互}$<0.001，$P_{组间}$=0.002，$P_{时间}$<0.001			$P_{交互}$=0.515，$P_{组间}$=0.598，$P_{时间}$<0.001		

组别	餐后 2 h 血糖（mmol/L）			糖化血红蛋白（%）			三酰甘油（mmol/L）		
	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后
对照组	14.39 ± 4.63	13.45 ± 0.52[a]	12.87 ± 0.27[ab]	8.42 ± 2.03	8.25 ± 0.44	8.12 ± 0.21	2.39 ± 0.30	1.88 ± 0.13[a]	1.92 ± 0.30[a]
运动组	14.63 ± 4.21	13.91 ± 0.76[ac]	12.12 ± 0.37[abc]	8.51 ± 1.91	8.25 ± 0.47	7.27 ± 0.34[ab]	2.39 ± 1.67	1.96 ± 0.48[a]	1.72 ± 0.32[ab]
F 值	$F_{交互}$=0.717，$F_{组间}$=3115.478，$F_{时间}$=7.102			$F_{交互}$=1.965，$F_{组间}$=1.426，$F_{时间}$=4.566			$F_{交互}$=1.822，$F_{组间}$=2.142，$F_{时间}$=16.859		
P 值	$P_{交互}$=0.491，$P_{组间}$<0.001，$P_{时间}$=0.001			$P_{交互}$=0.147，$P_{组间}$=0.240，$P_{时间}$=0.013			$P_{交互}$=0.177，$P_{组间}$=0.162，$P_{时间}$<0.001		

组别	胆固醇（mmol/L）			H- 胆固醇（mmol/L）			L- 胆固醇（kg/m^2）		
	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后
对照组	7.54 ± 0.52	6.97 ± 0.40[a]	6.67 ± 0.50[a]	1.06 ± 0.22	1.12 ± 0.12	1.15 ± 0.15	2.75 ± 0.55	2.65 ± 0.27	2.67 ± 0.43
运动组	7.46 ± 1.14	6.82 ± 0.35[a]	5.89 ± 0.20[abc]	1.05 ± 0.28	1.01 ± 0.17[c]	1.40 ± 0.37[ab]	2.93 ± 0.94	2.80 ± 0.35	2.36 ± 0.78[ab]
F 值	$F_{交互}$=4.299，$F_{组间}$=6.178，$F_{时间}$=3.938			$F_{交互}$=1.105，$F_{组间}$=0.577，$F_{时间}$=7.118			$F_{交互}$=0.090，$F_{组间}$=1.49，$F_{时间}$=0.127		
P 值	$P_{交互}$=0.019，$P_{组间}$=0.020，$P_{时间}$=0.026			$P_{交互}$=0.344，$P_{组间}$=0.459，$P_{时间}$=0.003			$P_{交互}$=0.914，$P_{组间}$=0.241，$P_{时间}$=0.881		

注：[a] 表示与同组与术前比较 $P<0.0167$，[b] 表示与同组术前 4 周比较 $P<0.0167$，[c] 表示与对照组比较 $P<0.0.0167$。



表 3　两组患者治疗前后心肺功能指标比较（$\bar{x} \pm s$）

Table 3　Comparison of cardiopulmonary function indicators between the two groups before and after treatment

组别	例数	峰值呼吸商			峰值摄氧量（L/min）			千克峰值摄氧量（mL.kg^{-1}.min^{-1}）			峰值代谢当量（METs）		
		术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后
对照组	30	1.09 ± 0.08	1.06 ± 0.08	1.10 ± 0.08	1.77 ± 0.33	1.63 ± 0.25[a]	1.51 ± 0.35[ab]	17.90 ± 3.46	15.38 ± 2.96[a]	16.6 ± 1.14[ab]	5.47 ± 0.89	4.80 ± 0.84[a]	5.10 ± 0.90[b]
运动组	30	1.07 ± 0.08	1.00 ± 0.02[ac]	1.08 ± 0.09[b]	1.54 ± 0.34[c]	1.52 ± 0.27	1.57 ± 0.48	17.0 ± 3.05	16.54 ± 2.04	19.59 ± 3.91[abc]	5.26 ± 0.84	5.01 ± 0.84	6.05 ± 1.15[abc]
F 值		$F_{交互}$=2.626，$F_{组间}$=4.308，$F_{时间}$=10.065			$F_{交互}$=6.709，$F_{组间}$=0.973，$F_{时间}$=2.541			$F_{交互}$=52.849，$F_{组间}$=34.181，$F_{时间}$=8.252			$F_{交互}$=6.597，$F_{组间}$=37.120，$F_{时间}$=7.299		
P 值		$P_{交互}$=0.077，$P_{组间}$=0.043，$P_{时间}$<0.001			$P_{交互}$=0.002，$P_{组间}$=0.328，$P_{时间}$=0.084			$P_{交互}$<0.001，$P_{组间}$<0.001，$P_{时间}$<0.001			$P_{交互}$=0.002，$P_{组间}$<0.001，$P_{时间}$=0.001		

组别	峰值功率（watts）			无氧阈下功率（watt）			千克峰值功率（watts/kg）			峰值每分通气量（L/min）		
	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后
对照组	136.95 ± 34.49	132.60 ± 29.87	126.75 ± 30.31	71.62 ± 16.63	61.31 ± 2.22[a]	72.50 ± 19.30[b]	1.50 ± 0.36	1.49 ± 0.33	1.47 ± 0.27	49.45 ± 14.38	35.34 ± 2.13[a]	45.61 ± 14.56[b]
运动组	126.00 ± 36.3	114.73 ± 33.05[c]	134.86 ± 31.95[ab]	72.10 ± 24.66	60.08 ± 2.77[a]	87.64 ± 29.41[abc]	1.39 ± 0.33	1.40 ± 0.40	1.65 ± 0.28[abc]	48.81 ± 13.16	37.59 ± 12.6[a]	49.36 ± 9.57[bc]
F 值	$F_{交互}$=7.355，$F_{组间}$=0.307，$F_{时间}$=2.733			$F_{交互}$=4.020，$F_{组间}$=2.678，$F_{时间}$=25.518			$F_{交互}$=4.990，$F_{组间}$=0.055，$F_{时间}$=3.320			$F_{交互}$=4.754，$F_{组间}$=4.355，$F_{时间}$=18.866		
P 值	$P_{交互}$=0.001，$P_{组间}$=0.582，$P_{时间}$=0.070			$P_{交互}$=0.021，$P_{组间}$=0.108，$P_{时间}$<0.001			$P_{交互}$=0.008，$P_{组间}$=0.816，$P_{时间}$=0.040			$P_{交互}$=0.011，$P_{组间}$=0.042，$P_{时间}$<0.001		

组别	二氧化碳通气当量斜率			无氧阈摄氧量（L/min）			千克无氧阈摄氧量（mL.kg^{-1}.min^{-1}）			无氧阈摄氧量占峰值摄氧量百分比		
	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后
对照组	28.15 ± 2.99	31.50 ± 1.27[a]	27.26 ± 3.01[b]	1.09 ± 0.24	0.99 ± 0.22	1.05 ± 0.22	10.71 ± 1.55	11.69 ± 0.97	13.35 ± 1.66[a]	0.62 ± 0.18	0.61 ± 0.21	0.70 ± 0.22
运动组	26.73 ± 2.22	30.58 ± 1.29[ac]	27.82 ± 3.73[ab]	1.11 ± 0.39	0.97 ± 0.16[a]	1.38 ± 0.28[abc]	11.24 ± 2.68	12.27 ± 2.86	17.68 ± 1.25[ac]	0.72 ± 0.37[c]	0.64 ± 0.19	0.88 ± 0.12[c]
F 值	$F_{交互}$=0.783，$F_{组间}$=0.447，$F_{时间}$=42.332			$F_{交互}$=47.591，$F_{组间}$=1.270，$F_{时间}$=9.153			$F_{交互}$=0.904，$F_{组间}$=27.689，$F_{时间}$=6.398			$F_{交互}$=22.146，$F_{组间}$=2.160，$F_{时间}$=9.944		
P 值	$P_{交互}$=0.460，$P_{组间}$=0.506，$P_{时间}$<0.001			$P_{交互}$<0.001，$P_{组间}$=0.265，$P_{时间}$<0.001			$P_{交互}$=0.408，$P_{组间}$<0.001，$P_{时间}$=0.002			$P_{交互}$<0.001，$P_{组间}$=0.148，$P_{时间}$<0.001		

组别	峰值氧脉搏（mL/ 次）			静息心率（次 /min）			峰值心率（次 /min）			无氧阈心率（次 /min）		
	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后
对照组	12.19 ± 2.14	12.41 ± 2.15	10.70 ± 2.56	90.71 ± 10.39	98.52 ± 6.07	86.35 ± 12.70	146.71 ± 15.25	154.24 ± 6.55[a]	141.95 ± 12.43[b]	124.81 ± 9.44	129.10 ± 5.92	118.45 ± 9.22[b]
运动组	10.62 ± 2.09[c]	11.16 ± 1.58[c]	12.18 ± 4.25[ab]	89.62 ± 8.49	96.81 ± 3.69[a]	85.86 ± 11.78[b]	154.00 ± 16.5	165.69 ± 4.3[ac]	146.27 ± 15.56[b]	119.43 ± 14.26	131.88 ± 4.76[a]	118.41 ± 11.17[b]
F 值	$F_{交互}$=6.771，$F_{组间}$=1.294，$F_{时间}$=0.812			$F_{交互}$=0.286，$F_{组间}$=2.144，$F_{时间}$=7.386			$F_{交互}$=1.447，$F_{组间}$=15.97，$F_{时间}$=20.431			$F_{交互}$=1.952，$F_{组间}$=0.566，$F_{时间}$=16.346		
P 值	$P_{交互}$=0.002，$P_{组间}$=0.260，$P_{时间}$=0.447			$P_{交互}$=0.752，$P_{组间}$=0.149，$P_{时间}$=0.001			$P_{交互}$=0.240，$P_{组间}$<0.001，$P_{时间}$<0.001			$P_{交互}$=0.147，$P_{组间}$=0.455，$P_{时间}$<0.001		

组别	静息收缩压（mmHg）			静息舒张压（mmHg）			峰值运动收缩压（mmHg）			峰值运动舒张压（mmHg）		
	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后	术前	术后 4 周	训练 12 周后
对照组	124 ± 17	119 ± 8	119 ± 17	81 ± 10	79 ± 6	83 ± 14	184 ± 26	180 ± 16	171 ± 27	88 ± 19	87 ± 10	92 ± 14
运动组	121 ± 23	129 ± 14[ac]	119 ± 10[b]	85 ± 15	84 ± 14	79 ± 7	187 ± 27	186 ± 19[a]	165 ± 22[b]	90 ± 22	87 ± 18	80 ± 11
F 值	$F_{交互}$=5.878，$F_{组间}$=0.001，$F_{时间}$=7.252			$F_{交互}$=1.612，$F_{组间}$=0.642，$F_{时间}$=0.950			$F_{交互}$=2.453，$F_{组间}$=0.420，$F_{时间}$=5.448			$F_{交互}$=1.839，$F_{组间}$=1.578，$F_{时间}$=0.749		
P 值	$P_{交互}$=0.004，$P_{组间}$=0.972，$P_{时间}$=0.001			$P_{交互}$=0.205，$P_{组间}$=0.427，$P_{时间}$=0.391			$P_{交互}$=0.094，$P_{组间}$=0.522，$P_{时间}$=0.007			$P_{交互}$=0.167，$P_{组间}$=0.218，$P_{时间}$=0.477		

注：[a] 表示与同组与术前比较 $P<0.0167$，[b] 表示与同组术前 4 周比较 $P<0.0167$，[c] 表示与对照组比较 $P<0.0167$。

下降促进了脂类代谢的加速，从而降低了脂质和脂蛋白的水平，对血脂调控起到关键作用[15]。抗阻运动通过调节血压和刺激血管内皮，提供额外的心血管益处，可通过提升高密度脂蛋白水平来改善血脂[16]。不同强度的抗阻运动对血脂的调节效果有所差异，中等强度及中高强度的抗阻运动被认为更有利于改善血脂水平[17]。

3.3　运动对心肺功能的影响

T2DM 合并肥胖患者的心肺功能普遍降低，本研究结果两组患者峰值呼吸商均 <1.1，表明限制 T2DM 合并肥胖患者运动的因素非心源性，与既往研究结果相似[18]。

与 DUN 等[19] 分析的 964 名中国人［平均年龄（49 ± 12）岁］的 CPET 结果比较，本研究纳入的患者更年轻［平均年龄（30 ± 8）岁］，但术前及术后 4 周千克峰值摄氧量，千克无氧阈摄氧量，峰值每分通气量，千克峰值功率及峰值代谢当量等心肺运动关键指标的水平却更低。也表明 T2DM 合并肥胖导致心肺功能降低。上述指标，运动组经 12 周运动后显著升高，提示有规律的运动能够改善心肺功能。

两组患者的二氧化碳通气当量斜率值在术前及训练 12 周后值与 DUN 等[19] 分析的结果相当（26~28），与国外研究中 50~59 岁无明显心脏疾患的 T2DM 患者类似[20]，而在术后 4 周升高（30~31）。二氧化碳通气当量斜率 >30 时预后较差，术后 4 周两组患者二氧化碳通气当量斜率值升高可能与活动量减少、心功能一过性下降导致循环血流变慢及肺换气效率降低有关。因患者无器质性心肺疾患，因此 12 周运动并未显著降低该指标，致两组无明显差异。另一个原因可能是运动时间较

短，运动带来的益处未充分发挥。

T2DM 合并肥胖患者具有较高的心血管不良时间发生率[21]。峰值代谢当量是评估患者运动能力、预后及病情严重程度的重要指标之一，每增加 1 MET 的运动能力，死亡率可降低 15%，而峰值代谢当量 <5 时预后最差[22]。两组患者的峰值代谢当量术前及术后 4 周值在 5 左右。运动组在完成 12 周运动后峰值代谢当量达 6，提示运动有助于提高 T2DM 合并肥胖患者术后运动能力，降低心血管不良事件发生率。

峰值氧脉搏代表每一次心脏搏动时的摄氧量或者是进入肺血管中的含氧量，反映冠脉血管的循环能力。运动组运动后该指标升高。两组心率在术后 4 周升高，运动干预后降低。干预后，两组休息收缩压和舒张压无差异；运动组峰值运动收缩压和峰值运动舒张压下降，而对照组无差异。这些指标的变化提示运动干预改善了心血管功能。

本研究局限性：本研究样本量较小，为单中心研究，未进行长期随访，未来有待于大样本、多中心、长期随访的研究，以获得更全面充分的临床证据。

综上所述，减重术后 4 周 T2DM 合并肥胖患者的心肺功能普遍降低；术后 12 周的运动训练能够降低患者的腹围，改善血糖血脂水平，改善心肺功能。

作者贡献：金彦、李新艳、张宁进行文章的构思与设计，结果的分析与解释，对文章整体负责，监督管理；金彦、王璐璐进行研究的实施与可行性分析；杨洋、郑清婉进行数据收集；金彦、杨洋进行数据整理、统计学处理，撰写及修订论文；李新艳、张宁负责文章的质量控制及审校。

本文无利益冲突。

参考文献

[1] IBACACHE-SAAVEDRA P，JEREZ-MAYORGA D，CARRETERO-RUIZ A，et al. Effects of bariatric surgery on cardiorespiratory fitness：a systematic review and meta-analysis［J］. Obes Rev，2022，23（3）：e13408. DOI：10.1111/obr.13408.

[2] BELLICHA A，VAN BAAK M A，BATTISTA F，et al. Effect of exercise training before and after bariatric surgery：a systematic review and meta-analysis［J］. Obes Rev，2021，22（Suppl 4）：e13296. DOI：10.1111/obr.13296.

[3] REN Z Q，LU G D，ZHANG T Z，et al. Effect of physical exercise on weight loss and physical function following bariatric surgery：a meta-analysis of randomised controlled trials［J］. BMJ Open，2018，8（10）：e023208. DOI：10.1136/bmjopen-2018-023208.

[4] DA SILVA A L G，SARDELI A V，ANDRÉ L D，et al. Exercise training does improve cardiorespiratory fitness in post-bariatric surgery patients［J］. Obes Surg，2019，29（4）：1416-1419. DOI：10.1007/s11695-019-03731-9.

[5] 毕丽娜，郑欣，戚艳艳，等. 肥胖对 2 型糖尿病患者心肺耐力的影响研究［J］. 中国全科医学，2021，24（27）：3420-3423. DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2021.00.496.

[6] 杨玲，余红艳，张洁，等. 2 型糖尿病合并肥胖患者运动心肺功能的特点［J］. 中华肥胖与代谢病电子杂志，2022，1）：30-35. DOI：10.3877/cma.j.issn.2095-9605.2022.01.005.

[7] 中华医学会糖尿病学分会. 中国 2 型糖尿病防治指南（2020 年版）［J］. 中华糖尿病杂志，2021，13（4）：315-409. DOI：10.3760/cma.j.cn115791-20210221-00095.

[8] AKALESTOU E，MIRAS A D，RUTTER G A，et al. Mechanisms of weight loss after obesity surgery［J］. Endocr Rev，2022，43（1）：19-34. DOI：10.1210/endrev/bnab022.

[9] TARDIF I，AUCLAIR A，PICHÉ M E，et al. Impact of a 12-week randomized exercise training program on lipid profile in severely obese patients following bariatric surgery［J］. Obes Surg，2020，30（8）：3030-3036. DOI：10.1007/s11695-020-04647-5.

[10] IN G，TASKIN H E，AL M，et al. Comparison of 12-week fitness protocols following bariatric surgery：aerobic exercise versus aerobic exercise and progressive resistance［J］. Obes Surg，2021，31（4）：1475-1484. DOI：10.1007/s11695-020-05144-5.

[11] FISCHER L E，WOLFE B M，FINO N，et al. Postbariatric hypoglycemia：symptom patterns and associated risk factors in the Longitudinal Assessment of Bariatric Surgery study［J］. Surg Obes Relat Dis，2021，17（10）：1787-1798. DOI：10.1016/j.soard.2021.04.021.

[12] KHAN K，AHMED L，SAEED K，et al. Improvement in glycated hemoglobin A1C after laparoscopic Roux-en-Y gastric bypass and sleeve gastrectomy in an ethnically diverse population with diabetes［J］. Surg Obes Relat Dis，2020，16（10）：1414-1418. DOI：10.1016/j.soard.2020.06.004.

[13] CHUMAKOVA-ORIN M，VANETTA C，MORIS D P，et al. Diabetes remission after bariatric surgery［J］. World J Diabetes，2021，12（7）：1093-1101. DOI：10.4239/wjd.v12.i7.1093.

[14] WU T T，WONG C K H，LUI D T W，et al. Bariatric surgery，novel glucose-lowering agents，and insulin for type 2 diabetes and obesity：Bayesian network meta-analysis of randomized controlled trials［J］. BJS Open，2023，7（4）：zrad077. DOI：10.1093/bjsopen/zrad077.

[15] LEOŃSKA-DUNIEC A，JASTRZĘBSKI Z，ZARĘBSKA A，et al.Assessing effect of interaction between the FTO A/T polymorphism（rs9939609）and physical activity on obesity-related traits［J］. J Sport Health Sci，2018，7（4）：459-464. DOI：10.1016/j.jshs.2016.08.013 .

[16] AGGARWAL V，KASHYAP D，SAK K，et al. Molecularmechanisms of action of tocotrienols in cancer：recent trends and advancements［J］. Int J Mol Sci，2019，20（3）. DOI：10.3390/ijms20030656.

[17] TEIXEIRA B C，KRÜGER R L，FARINHA J B，et al. Aerobic exercise improves postprandial inflammatory and hemostatic markers after a high-fat meal：a randomized crossover study［J］. Appl Physiol Nutr Metab，2021，46（6）：637-643. DOI：10.1139/apnm-2020-0463.

[18] BATTISTA F，BELLIGOLI A，NEUNHAEUSERER D，et al.



Metabolic response to submaximal and maximal exercise in people with severe obesity，prediabetes，and diabetes［J］. Obes Facts，2021，14（4）：415-424. DOI：10.1159/000517589.

［19］DUN Y S，OLSON T P，LI C，et al. Characteristics and reference values for cardiopulmonary exercise testing in the adult Chinese population-the Xiangya hospital exercise testing project（the X-ET project）［J］. Int J Cardiol，2021，332：15-21. DOI：10.1016/j.ijcard.2021.03.013.

［20］KINOSHITA N，YAMADA S，UCHIYAMA E. Feasibility and effectiveness of cardiopulmonary exercise testing in people with type 2 diabetes mellitus［J］. Eur J Prev Cardiol，2024，31（Supplement_1）：Supplement_1. DOI：10.1093/eurjpc/zwae175.238.

［21］QIAO T T，LUO T，PEI H L，et al. Association between abdominal obesity indices and risk of cardiovascular events in Chinese populations with type 2 diabetes：a prospective cohort study［J］. Cardiovasc Diabetol，2022，21（1）：225. DOI：10.1186/s12933-022-01670-x.

［22］FRANKLIN B A，EIJSVOGELS T M H，PANDEY A，et al. Physical activity，cardiorespiratory fitness，and cardiovascular health：a clinical practice statement of the American society for preventive cardiology part II：physical activity，cardiorespiratory fitness，minimum and goal intensities for exercise training，prescriptive methods，and special patient populations［J］. Am J Prev Cardiol，2022，12：100425. DOI：10.1016/j.ajpc.2022.100425.

（收稿日期：2024-07-10；修回日期：2024-11-10）

（本文编辑：赵跃翠）